

Список литературы

- 1 **Баженов, В. Г.** Методы граничных интегральных уравнений и граничных элементов в решении задач трехмерной динамической теории упругости с сопряженными полями. – М. : Физматлит, 2008 – 352 с.
- 2 **Желтков, В. И.** Переходные функции в динамике вязкоупругих тел / В. И. Желтков, Л. А. Толоконников, Н. Г. Хромова // Докл. РАН. – 1993. – Т. 329, № 6. – С. 718–719.
- 3 **Ильясов, М. Х.** Нестационарные вязкоупругие волны / М. Х. Ильясов. – Баку, 2011 – 330 с.
- 4 **Круссер, А. И.** Численный анализ нелинейных колебаний пластины на вязкоупругом основании под действием подвижной осциллирующей нагрузки на основе моделей с дробными производными / А. И. Круссер, М. В. Шитикова // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. физ.-мат. науки. – 2022. – Т. 26, № 4. – С. 694–714. – DOI : 10.14498/vsgtu1957.
- 5 **Лычева, Т. Н.** Спектральные разложения в динамических задачах вязкоупругости / Т. Н. Лычева, С. А. Лычев // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2016. – № 4. – С. 120–150. – DOI : 10.15593/perm.mech/2016.4.08
- 6 **Филиппов, И. Г.** Математическая теория колебаний упругих и вязкоупругих пластин и стержней / И. Г. Филиппов, В. Г. Чебан. – Кишинев : Штиинца, 1988. – 190 с.
- 7 **Colombaro, I.** On the propagation of transient waves in a viscoelastic Bessel medium / I. Colombaro, A. Giusti, F. Mainardi // Z. Angew. Math. Phys. – 2017. – 68. – Art. number: 62. – DOI : 10.1007/s00033-017-0808-6.
- 8 **Rossikhin, Yu. A.** Analysis of the Viscoelastic Sphere Impact Against a Viscoelastic Uflyand-Mindlin Plate Considering the Extension of its Middle Surface / Yu. A. Rossikhin, M. V. Shitikova, Thanh Trung Phan // Shock and Vibration. – 2017. – Art. ID 5652023. – <https://doi.org/10.1155/2017/5652023>.
- 9 **Пшеничников, С. Г.** Нестационарные динамические задачи линейной вязкоупругости / С. Г. Пшеничников // Известия РАН. МТТ. – 2013. – № 1. – С. 84–96.

УДК 539.422.52

ДИНАМИКА ТРЕХСЛОЙНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПАНЕЛЕЙ С ВНУТРЕННИМИ ДЕФЕКТАМИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ НАГРУЗОК РАЗЛИЧНОЙ ФИЗИЧЕСКОЙ ПРИРОДЫ

Л. Н. РАБИНСКИЙ

Московский авиационный институт (НИУ), Российская Федерация

М. И. МАРТИРОСОВ, Д. В. ДЕДОВА

Московский авиационный институт (НИУ), Российская Федерация

Корпорация «Иркут», г. Москва

Трехслойные панели представляют собой конструкцию, состоящую из двух тонких прочных внешних слоев – обшивок, часто выполненных из полимерных композиционных материалов (ПКМ), которые связаны между собой слоем заполнителя, разделяющего внешние (несущие) слои. Для конструкций с заполнителем при действии внешних нагрузок характерна совместная работа всех составных элементов слоистого пакета. Заполнитель воспринимает поперечное сжатие и поперечный сдвиг и предохраняет достаточно тонкие несущие слои (из ПКМ) от местной и общей потери устойчивости, обеспечивая их совместную работу и высокую жесткость. Несущие слои воспринимают продольное растяжение, сжатие, изгиб и поперечный сдвиг в своей плоскости и предохраняют от внешних воздействий заполнитель.

Трехслойные панели широко применяются в различных отраслях современной промышленности, например, в авиастроении. Такое распространение панели приобрели благодаря малому весу, высокой удельной прочности, устойчивости при сжатии, значительной жесткости на изгиб, хорошим тепло- и звукоизолирующим свойствам, высокой технологичности и возможностью полной автоматизации процесса изготовления, хорошей эксплуатационной надежности вследствие отсутствия концентраторов напряжений, высоким качеством формы и поверхности. Важным преимуществом таких панелей является высокое сопротивление акустическим воздействиям.

В гражданской авиации такие панели используются при изготовлении интерьеров пассажирских самолетов, элементов конструкции планеров: килей и форкилей, кока, закрылков, предкрылков, рулей направления, стабилизаторов, элеронов, рулей высоты и т. д.

По способности воспринимать продольные усилия заполнители можно разделить на два вида:

- легкий заполнитель, который обладает малым по сравнению с несущими слоями модулем упругости в направлении, параллельном поверхности несущих слоев;
- жесткий заполнитель, который обладает сравнимым по величине с несущими слоями модулем упругости в направлении, параллельном поверхности несущих слоев.

В связи с этим существует определенная специфика в аналитических расчетах панелей с названными видами заполнителей. Так, в панелях с легкими заполнителями можно пренебречь напряжениями растяжения-сжатия в направлении, параллельном поверхности несущих слоев.

Сотовые заполнители относятся к легким, а, например, заполнители типа гофр – к жестким. Другие заполнители относятся к тому или иному виду в зависимости от конкретных соотношений жесткостей несущих слоев и заполнителя в направлении, параллельном поверхности несущих слоев.

В трехслойных панелях в результате внешних воздействий при эксплуатации или в процессе производства (производственные отклонения) могут возникать дефекты (повреждения), которые оказывают влияние на прочность и несущую способность готового изделия.

В данной работе рассматриваются трехслойные цилиндрические панели с сотовым заполнителем и обшивкой из ПКМ различных марок. Форма панелей – прямоугольная в плане, геометрия задана, включая радиус кривизны. В различных местах панели (в верхней обшивке) между монослоями и между монослоем и заполнителем могут присутствовать множественные дефекты различной формы (эллиптической, круговой, прямоугольной) с заданными геометрическими размерами. По существующей классификации такие дефекты относятся к внутренним. В общем случае рассматриваются дефекты произвольной формы и размеров. В этом случае границы дефектов аппроксимируются набором прямых.

Рассматриваются следующие варианты используемых материалов монослоя: клеевые препреги марки КМКУ-2м.120.Р-2009 (углеродная ткань Р-2009 французской фирмы «Porsher Industries» Арт. 2009 и клеевая композиция), КМКУ-2м.120.Р-4510 (углеродная лента Р-4510 фирмы «Porsher Industries» Арт. 4510 и клеевая композиция), а также клеевые препреги марки КМКС-2м.120.Т60 (стеклоткань Т60/2(ВМП)-78 и клеевая композиция), КМКС-2м.120.Т64 (стеклоткань Т64/2(ВМП)-14 и клеевая композиция). Все необходимые физико-механические характеристики монослоев, а также толщины монослоев – паспортные от производителей материалов (получены экспериментально). Исходные данные соответствуют режиму RTD (Room Temperature Dry): испытания при комнатной температуре и влажности в состоянии поставки (это состояние, в котором находятся образцы для определения прочностных и упругих характеристик сразу после изготовления, содержание влаги в них не превышает 10 % от максимального влагонасыщения при относительной влажности 85 %). Стекло- и углепластики на основе клеевых препрегов по сравнению с аналогичными традиционными материалами имеют повышенную трещиностойкость, прочность при межслоевом сдвиге, усталостную и длительную прочность, высокую эрозионную стойкость и часто используются для изготовления деталей конструкционного назначения, в том числе и трехслойных.

Исследуются различные схемы укладки монослоев в обшивках и их количество.

В качестве заполнителя рассматриваются сотовые заполнители следующих марок: полимеросотопласты ПСП-1 (на основе полимерной бумаги типа «Номекс» и фенольного связующего) и ПСП-1К (на основе полимерной бумаги типа «Кевлар» и фенольного связующего) различной плотности и размера ячейки, а также стеклосотопласты ССП-1 на основе электроизоляционной ткани Э3-100П (возможна замена на Э3/1-100П, Э1/1-100 или Э1/1-100П), бакелитового лака ЛБС-1 и клея БФ-2. Форма ячеек у всех изучаемых заполнителей – гексагональная. Исследуются следующие сотовые заполнители: ПСП-1-2,0-48, ПСП-1-2,0-64, ПСП-1-2,0-96, ПСП-1-2,0-144; ПСП-1К-2,0-48, ПСП-1К-2,0-64, ПСП-1К-2,0-96, ПСП-1К-2,0-144; ССП-1-2,5, ССП-1-3,5. Необходимые для расчета характеристики заполнителей известны от производителей этих материалов, высота сотового пакета задана.

В работе анализируются следующие типы воздействий на изучаемые панели: нестационарные поля давлений, распределенные по различным законам; удар абсолютно жестким бойком полусферической формы; удар множественными и одиночными фрагментами из армированной резины, имеющими форму прямоугольного параллелепипеда (разрыв покрышки колеса шасси самолета при движении по взлетно-посадочной полосе аэродрома при взлете или посадке); воздействие от набегающей волны давления заданной интенсивности, имитирующей действие потока струи двигателя пассажирского самолета на панель корневого закрылка, являющуюся трехслойной, а также другие динамические воздействия.

Рассматривается поведение данных трехслойных цилиндрических панелей под действием перемещенных выше нагрузок динамического характера при наличии дефектов, в том числе множественных произвольно расположенных различной формы и размеров.

Задача решается численно методом конечных элементов (МКЭ). Создание конечно-элементной сетки осуществляется в программном комплексе Simcenter Femap. Каждый слой моделируется отдельным набором конечных элементов (КЭ). Затем модель импортируется в программный комплекс LS-DYNA (Livermore Software Technology Corp.), где задаются нагрузка и граничные условия.

В результате проведенного численного исследования определяется распределение полей напряжений и деформаций в монослоях панелей в различные моменты времени. Вычисляется распределение индекса разрушения по различным критериям разрушения применительно к ПКМ. Расчет проводится по критериям Puck, Hashin, Puppo-Evencen, Hoffman, LaRC (Langley Research Center). Считается, что разрушение наступает, когда индекс разрушения становится равным единице. Данные критерии соответствуют структурно-феноменологическому подходу при решении задач прочности ПКМ. Они выводятся на основе анализа и статистического обобщения данных, полученных экспериментальным путем. Их преимуществом является относительная простота. Более точным решением задачи прочности ПКМ был бы структурный метод с анализом микроструктуры материала конструкции, дающий возможность моделировать прогрессирующее разрушение материала, момент зарождения и развития трещины, усталостные и динамические разрушения.

Приводится сравнение полученных результатов для панелей с различными вариантами исполнения сотового заполнителя и обшивок, а также сравнение результатов для панелей с дефектами и аналогичными неповрежденными панелями. Проводится параметрический анализ.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 23-49-00133, выданного Московскому авиационному институту.

УДК 536.24

МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ МОДИФИЦИРОВАННЫХ КОМПОЗИТОВ С ВИСКЕРИЗОВАННЫМИ ВОЛОКНАМИ

Л. Н. РАБИНСКИЙ, Д. С. ШАВЕЛКИН

Московский авиационный институт (НИИ), Российская Федерация

Моделирование композиционных материалов (КМ) содержит фундаментальную проблему, так как в макромасштабе они считаются однородными континуумами, а в микромасштабе – существенно неоднородными, т. е. компоненты или фазы композита различаются по свойствам и между ними существует явная граница раздела (интерфейс или межфазной слой особенно в полимерной матрице). В связи с этим эффективные свойства КМ в целом зависят от характеристик фаз композитов (их свойств, объемного содержания, формы, размера, распределения и ориентации), состояния интерфейса или межфазного слоя, а также внутренних взаимодействий (когезионных и адгезионных эффектов). Кроме того, параметры обработки в производстве также влияют как на свойства отдельных фаз, так и на эффективные свойства композитов. Таким образом, для определения макроскопических свойств КМ важную роль играет микромеханика.

Микромеханика – область механики материалов, в которой дается анализ композитных или гетерогенных материалов на уровне отдельных компонентов, составляющих эти материалы. Учитывая свойства материалов компонентов композитов, как уже упоминалось ранее, одной из важных целей микромеханики материалов является моделирование деформации и характеристик КМ, эта задача определяется как осреднение или гомогенизация. Преимущество гомогенизации заключается в том, что поведение гетерогенных материалов может быть определено без обращения к испытанию потому, что такое испытание может быть весьма дорогим. Кроме того, результаты экспериментов представляют собой так или иначе макромасштабные данные. Тем не менее конкретная теория микромеханики должна быть проверена путем сравнения с экспериментальными данными. Вторая основная задача микромеханики – это локализация, которая направлена на оценку локальных полей (напряжения и деформаций) в фазах под действием макроскопической нагрузки. Такое знание особенно важно для описания повреждения материала.

Осреднение Фойхта и Рейсса являются самыми простыми методами при определении свойств КМ (двухфазных и многофазных), хотя и эти методы первоначально были созданы для изучения